

## Оценка влияния уровня остаточных напряжений на предельные напряжения цикла сварных конструкций по результатам испытаний малогабаритных образцов

В. А. Дегтярев

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Предложена методика определения диаграмм предельных напряжений цикла сварных соединений с наперед заданными установившимися остаточными напряжениями по результатам испытаний малогабаритных образцов без остаточных напряжений.*

**Ключевые слова:** диаграмма предельных напряжений цикла, предел выносливости, остаточное напряжение, предел текучести, минимальный предел циклической ползучести, амплитуда напряжений цикла, среднее напряжение цикла.

В исследованиях [1, 2] было установлено влияние высоких остаточных напряжений (ОН) растяжения на снижение сопротивления усталости сварных конструкций. Чтобы определить влияние той или иной величины ОН на их сопротивление усталости, необходимо проведение экспериментальных исследований, которые являются дорогими и продолжительными во времени. В [3] ОН принято считать высокими и влияющими на прочность сварных конструкций при соблюдении условия  $\sigma_{\text{ост}} > 0,5\sigma_T$ , где  $\sigma_T$  – предел текучести основного металла при растяжении. Остаточные напряжения  $\sigma_{\text{ост}} < 0,5\sigma_T$  полагают низкими, и они на прочность конструкций не влияют. Однако такое разделение ОН является условным, так как они в зависимости от величины максимального напряжения от внешней нагрузки могут изменяться в широком диапазоне с различной степенью влияния на прочность сварных соединений.

Цель настоящей работы заключается в обосновании методики расчета диаграмм предельных напряжений цикла (ДПНЦ) сварных соединений с любой величиной наперед заданных остаточных напряжений по результатам испытаний малогабаритных образцов без остаточных напряжений.

В данное время сопротивление усталости сварных соединений с высокими ОН оценивают, как правило, по напряжениям от внешней нагрузки. Экспериментальные исследования [4, 5] показывают, что степень влияния ОН на сопротивление усталости сварных соединений значительно зависит от многих факторов, в том числе от уровня действующих напряжений и коэффициента асимметрии цикла  $R_\sigma$ . С их увеличением разница между пределами выносливости сварных соединений с высокими ОН и без них уменьшается вследствие снижения ОН. Проведенная ранее [6] обработка экспериментальных данных свидетельствует: если учитывать влияние ОН и напряжений от внешней нагрузки, то, несмотря на наличие в сварных соединениях разной величины ОН или их отсутствие, все диаграммы предельных напряжений цикла трансформируются в единую диаграмму, уравнение которой можно записать в виде

$$\sigma_{R\Sigma} = \sigma_{R_i} + (1 - \Psi_\sigma)(\sigma_m - \sigma_{mR_i} + \sigma_{\text{ост}}^y), \quad (1)$$

где  $\sigma_{R_i}$  и  $\sigma_{mR_i}$  – предел выносливости сварного соединения без остаточного напряжения и соответствующее ему среднее напряжение цикла, определенное при значении коэффициента асимметрии цикла  $R_\sigma$ ;  $\Psi_\sigma$  – коэффициент чувствительности к асимметрии цикла напряжений;  $\sigma_{\text{ост}}^y$  – установившееся значение остаточного напряжения [5]. Трудности в оценке степени влияния величины ОН на усталостную прочность сварных конструкций обусловили необходимость разработки методики расчета ДПНЦ сварного соединения с наперед заданным значением  $\sigma_{\text{ост}}^y$ .

Задавая на единой диаграмме предельных напряжений цикла любую точку и рассматривая ее в виде суммы предела выносливости и установившегося значения остаточного напряжения ( $\sigma_{R\Sigma} = \sigma_R + \sigma_{\text{ост}}^y$ ), можно, преобразуя формулу (1), определить среднее напряжение от внешней нагрузки, при действии которого в сварном образце остается заданное значение  $\sigma_{\text{ост}}^y$ :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{R\Sigma} - \sigma_{R_i}}{1 - \Psi_\sigma} + \sigma_{mR_i} - \sigma_{\text{ост}}^y. \quad (2)$$

Предельную амплитуду цикла можно определить из выражения

$$\sigma_a^\Pi = \sigma_{R\Sigma} - (\sigma_m + \sigma_{\text{ост}}^y). \quad (3)$$

После некоторых преобразований уравнение для нахождения  $\sigma_a^\Pi$  будет иметь вид

$$\sigma_a^\Pi = \frac{\sigma_{R_i} - \sigma_{R\Sigma}\Psi_\sigma}{1 - \Psi_\sigma} - \sigma_{mR_i}. \quad (4)$$

Предел выносливости сварного соединения с заданным значением  $\sigma_{\text{ост}}^y$  определяется как

$$\sigma_{Rw} = \sigma_a^\Pi + \sigma_m = \sigma_{R\Sigma} - \sigma_{\text{ост}}^y \quad (5)$$

или после преобразований –

$$\frac{\sigma_{Rw}}{\sigma_{R_i}} = 1 + \frac{\sigma_m(1 - \Psi_\sigma) - \sigma_{mR_i}(1 - \Psi_\sigma) - \Psi_\sigma\sigma_{\text{ост}}^y}{\sigma_{R_i}}. \quad (6)$$

Зная, что  $\Psi_\sigma = \sigma_{-1}/\sigma_B$ ,  $\sigma_{R_i} = \sigma_{-1}$ , при проведении испытаний в условиях растяжения получаем

$$\sigma_{Rw} = \sigma_{-1} + \sigma_m(1 - \Psi_\sigma) - \Psi_\sigma\sigma_{\text{ост}}^y = \frac{\sigma_{-1}(\sigma_B - \sigma_{\text{ост}}^y) + \sigma_m(\sigma_B - \sigma_{-1})}{\sigma_B}. \quad (7)$$

Ясно, что с ростом  $\sigma_m$  предел выносливости сварного соединения увеличивается. Из литературных источников [5] известно, если сумма исходного ОН и напряжения от внешней нагрузки достигает предела текучести ( $\sigma_{R\Sigma} = \sigma_T$ ), то такое остаточное напряжение считается предельным. Поэтому из формулы (5) следует: чем больше напряжение от внешней нагрузки (в данном случае предел выносливости), тем меньше величина предельного остаточного напряжения, т.е.  $\sigma_{ост}^II = \sigma_T - \sigma_{Rw}$ .

Предлагаемая методика может быть реализована при соблюдении условия  $\sigma_{Rw} + \sigma_{ост}^II < \sigma_T$ . В этом случае исходные остаточные напряжения  $\sigma_{ост}^II$  при циклическом нагружении сварного соединения не достигают предельной величины и не изменяются, т.е.  $\sigma_{ост}^II = \sigma_{ост}^Y$ . Поэтому во всех вышеприведенных формулах можно использовать значение исходного ОН, определенное после сварки изделия.

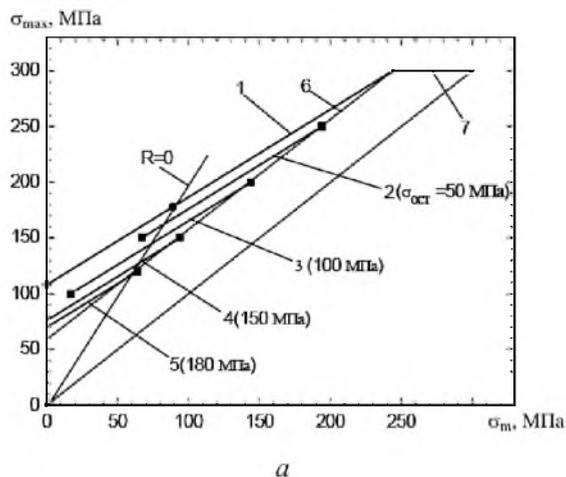
В качестве примера в табл. 1 приведены расчетные значения характеристик сопротивления усталости стыковых соединений низкоуглеродистой и низколегированной стали 09Г2С с разным уровнем заданных значений  $\sigma_{ост}^II$ . Для соединений из низкоуглеродистой стали  $\Psi_\sigma$  определяли по экспериментально определенным пределам выносливости при двух значениях  $R_\sigma$ , поскольку испытания проводили в условиях изгиба [1].

Т а б л и ц а 1

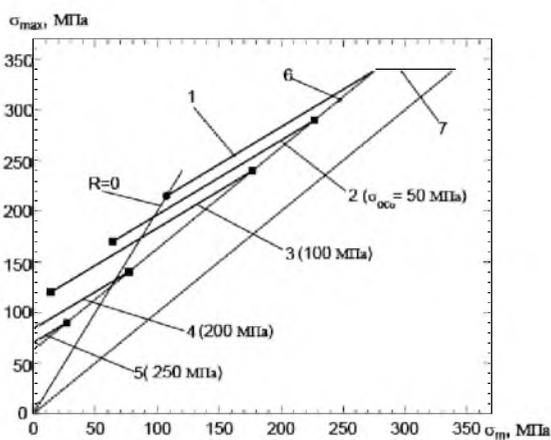
Расчетные значения предельных напряжений цикла сварных соединений с разным уровнем значений заданных  $\sigma_{ост}^II$

Марка стали, вид соединения	$\sigma_{R\Sigma}$ , МПа	$\sigma_{m\Sigma}$ , МПа	$\sigma_{ост}^II$ , МПа	$\sigma_m$ , МПа	$\sigma_a^II$ , МПа	$\sigma_{Rw}$ , МПа
	1	2	3	4	5	6
Низкоуглеродистая, стыковое	300	244	180	64	56	120
	200	117	180	-63	83	20
	300	244	150	94	56	150
	200	117	150	-33	83	50
	300	244	100	144	56	200
	200	117	100	17	83	100
	300	244	50	194	56	250
	200	117	50	67	83	150
Низколегированная 09Г2С, стыковое	340	277	250	27	63	90
	220	113	250	-137	107	-30
	340	277	200	77	63	140
	220	113	200	-87	107	20
	340	277	100	177	63	240
	220	113	100	13	107	120
	340	277	50	227	63	290
	220	113	50	63	107	170

**Примечание.** Здесь и в табл. 2: для низкоуглеродистой стали  $\sigma_T = 300$  МПа,  $\sigma_B = 410$  МПа, для низколегированной – соответственно 340 и 518 МПа.



а



б

Рис. 1. Диаграммы предельных напряжений цикла сварных стыковых соединений низкоуглеродистой (а) и низколегированной стали 09Г2С (б): 1 – малогабаритные образцы без остаточных напряжений; 2–5 – крупногабаритные с заданным уровнем остаточных напряжений; 6 – крупногабаритные с разным уровнем предельных остаточных напряжений; 7 – линия предела текучести (●, ■ – экспериментальные и расчетные значения предела выносливости соответственно).

Используя данные табл. 1 (столбцы 4, 6), зависимость  $\sigma_{Rw}$  от  $\sigma_m$  можно представить в виде диаграмм предельных напряжений цикла сварных соединений только от внешней нагрузки (рис. 1). Обращает на себя внимание тот факт, что полученное семейство прямых 2–5 (рис. 1) для соединений из низкоуглеродистой и низколегированной стали с заданным уровнем  $\sigma_{ост}^H$  для каждой, параллельны между собой, параллельны также ДПНЦ сварных малогабаритных образцов без ОН (линия 1). Это подтверждают и данные, полученные в работе [7]. Из рис. 1 видно, что с увеличением  $\sigma_{ост}^H$  каждая последующая диаграмма располагается несколько ниже предыдущей и заканчиваются они в точках, расположенных на прямой 6, которая параллельна прямой, проведенной под углом  $45^\circ$ . Каждая точка на прямой 6 имеет одинаковую предельную амплитуду цикла при разных средних напряжениях: для

низкоуглеродистой стали она равна 56 МПа, для низколегированной – 63 МПа. В [1] такую прямую называют ДПНЦ крупногабаритных образцов с высокими остаточными напряжениями. Уравнение такой диаграммы при  $\sigma_{R\Sigma} = \sigma_T$  с использованием выражения (4) имеет вид [6]

$$\sigma_{Rp} = \frac{2\sigma_a^{\text{п}}}{1 - R_{\sigma}} = \frac{2}{1 - R_{\sigma}} \left( \frac{\sigma_{R_i} - \sigma_T \Psi_{\sigma}}{1 - \Psi_{\sigma}} - \sigma_{mR_i} \right). \quad (8)$$

В действительности каждая точка на прямой 6 соответствует пределу выносливости сварного соединения со своим значением остаточного напряжения. В данном случае представленная зависимость позволяет определить предел выносливости, при котором в сварном образце исходное остаточное напряжение будет предельным, так как считается, что  $\sigma_{Rp} + \sigma_{\text{ост}}^{\text{п}} = \sigma_T$ , поскольку принято [8] ДПНЦ сверху ограничивать линией 7 (рис. 1) на уровне предела текучести. Однако это ограничение несовершенно, так как в каждой точке на данной прямой в результате различной комбинации среднего напряжения цикла и амплитуды напряжений при максимальном напряжении, равном пределу текучести, происходит накопление неодинаковой величины остаточной деформации. Объяснить это можно только тем, что предел текучести – наиболее просто экспериментально определяемая характеристика, значение которой приводится в каждом справочнике или паспорте на испытание материала. Логичнее ДПНЦ ограничивать характеристикой, полученной также в условиях циклического нагружения. В качестве такой характеристики можно предложить минимальный предел циклической ползучести  $\sigma_{\text{ц.п}}$  [9], т.е. напряжение, равное пределу выносливости, при котором на установленной базе испытаний вследствие циклической ползучести развивается остаточная деформация, соответствующая таковой на уровне  $\sigma_T$ . С методической точки зрения трудоемкость получения данной характеристики несколько сложнее. Ранее [9] на примере испытаний низколегированных сталей 09Г2С и 14Х2ГМР было установлено, что  $\sigma_{\text{ц.п}}$  на 9 и 14% меньше  $\sigma_T$  соответственно. Поэтому предел выносливости сварного соединения с высокими ОН, если принять  $\sigma_{\text{ц.п}} = \sigma_{R\Sigma}$ , следует рассчитывать по формуле

$$\sigma_{Rp} = \frac{2}{1 - R_{\sigma}} \left( \frac{\sigma_{R_i} - \Psi_{\sigma} \sigma_{\text{ц.п}}}{1 - \Psi_{\sigma}} - \sigma_{mR_i} \right). \quad (9)$$

В результате такого ограничения по сравнению с принятым на уровне  $\sigma_T$  [3] установлено, что разница между экспериментальными и расчетными значениями предела выносливости сварных соединений значительно уменьшается. Экспериментальные и расчетные ДПНЦ сварных крупногабаритных соединений, для определения которых использовали значения предела текучести (8) и минимального предела циклической ползучести (9), приведены на рис. 2. В результате испытаний сварного стыкового соединения низколегированной стали 09Г2С разница между расчетным пределом выносливости ( $\sigma_{-1p}^{\text{р}} = 67$  МПа), определенным по формуле (27), приведенной в работе [6],

где использовалась точка пересечения ДПНЦ без ОН (на рис. 2 линия 4) с пределом текучести, и экспериментальным значением предела выносливости крупногабаритного образца при симметричном цикле ( $\sigma_{-1p} = 80$  МПа) составляет 18%. В то же время, если использовать в расчетах значение минимального предела циклической ползучести, ошибка составляет всего 7%, так как расчет по формуле (9) показывает, что  $\sigma_{-1p}^p = 74$  МПа. На рис. 2 линия 3 несколько ближе расположена к линии 1. Полученную зависимость (9) можно использовать для определения ДПНЦ сварных соединений других марок стали. Кроме того, в расчетах допускается использование предела ползучести материала, хотя это приведет к несколько большей погрешности в определении предела выносливости сварного соединения.

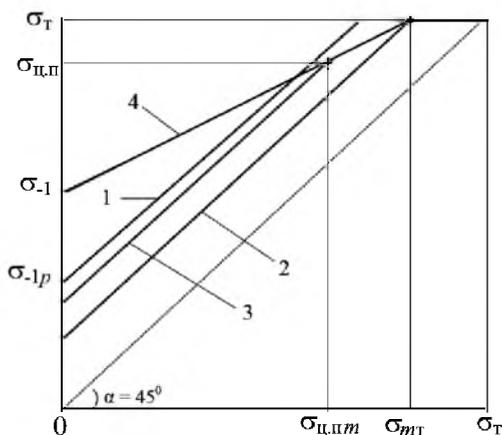


Рис. 2. Схема определения диаграммы предельных напряжений цикла крупногабаритных сварных соединений с высокими ОН по результатам испытаний малогабаритных образцов: 1 – экспериментальная; 2, 3 – расчетные диаграммы предельных напряжений цикла стыковых крупногабаритных соединений; 4 – диаграмма предельных напряжений цикла образцов без ОН.

Поскольку, как отмечалось выше, каждая точка на прямой *b* (рис. 1) соответствует пределу выносливости сварного соединения со своим значением предельного остаточного напряжения, можно определить его значение, которое в процессе циклического нагружения не изменяется и в данном случае будет считаться установившимся. При этом следует исходить из того, что  $\sigma_{ост}^n + \sigma_{R\sigma} = \sigma_{ц.п.}$ . Тогда выражение для определения  $\sigma_{ост}^n$  при  $\sigma_{R_i} = \sigma_{-1}$  и  $\Psi_\sigma = \sigma_{-1} / \sigma_B$  будет иметь вид

$$\frac{\sigma_{ост}^n}{\sigma_{ц.п.}} = 1 - \frac{2(\sigma_B - \sigma_{ц.п.})}{(1 - R_\sigma)(\sigma_B / \sigma_{-1} - 1)\sigma_{ц.п.}}, \quad (10)$$

где  $\sigma_{ост}^n$  с увеличением  $R_\sigma$  уменьшается.

Можно также определить влияние величины установившегося ОН на предел выносливости сварных соединений. На основании данных, приведенных в табл. 2, на рис. 3 в относительных координатах представлено влияние  $\sigma_{ост}^y$  на сопротивление усталости сварных стыковых соединений

низкоуглеродистой и низколегированной стали 09Г2С при симметричном цикле нагружения. Видно, что с увеличением остаточного напряжения происходит значительное снижение пределов выносливости исследуемых сварных соединений. В зависимости от марки стали влияние остаточных напряжений проявляется в разной степени. Если до настоящего времени полагали [3], что ОН, равные  $0,5\sigma_T$ , низкие и не влияют на сопротивление усталости, то из рис. 3 следует, что такая величина снижает сопротивление усталости соединений из низкоуглеродистой стали на 30%, из низколегированной – на 33%.

Т а б л и ц а 2

**Влияние величины установившегося ОН на предел выносливости сварных соединений**

Марка стали, вид соединения	$\sigma_{ост}^y$ , МПа	$\sigma_{ост}^y / \sigma_T$	$\sigma_{-1w}$ , МПа	$\sigma_{-1w} / \sigma_{-1}$
Низкоуглеродистая, стыковое	180	0,60	70	0,65
	150	0,50	76	0,70
	100	0,33	87	0,80
	50	0,17	96	0,89
Низколегированная, стыковое	250	0,74	70	0,51
	200	0,59	83	0,61
	100	0,29	110	0,80
	50	0,15	123	0,90

**Примечание.** Для низкоуглеродистой стали  $\sigma_{-1} = 108$  МПа, для низколегированной 09Г2С – 137 МПа без ОН.

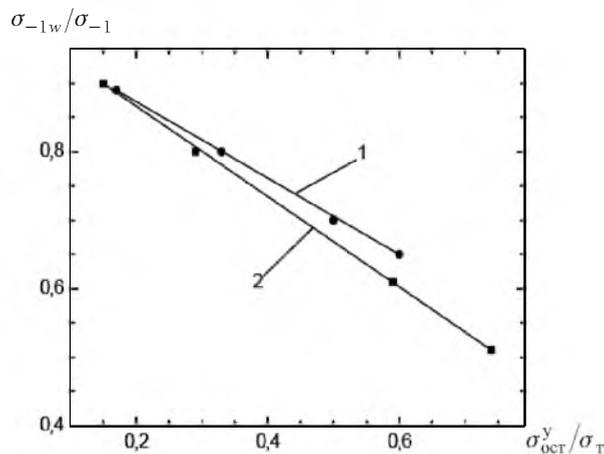


Рис. 3. Влияние установившихся остаточных напряжений на сопротивление усталости сварных стыковых соединений низкоуглеродистой стали (1) и низколегированной стали 09Г2С (2).

Учитывая, что существует единая диаграмма предельных напряжений, можно решить и обратную задачу, а именно: задаваясь средним напряжением цикла от внешней нагрузки  $\sigma_m$ , определить значение установившегося остаточного напряжения. После некоторых преобразований уравнения (1) выражение для определения  $\sigma_{ост}^y$  будет иметь вид

$$\sigma_{\text{ост}}^y = \frac{\sigma_{R\Sigma} - \sigma_{R_i}}{1 - \Psi_\sigma} - \sigma_m + \sigma_{mR_i}. \quad (11)$$

При  $\sigma_{\text{ц.п}} = \sigma_{R\Sigma}$ ,  $\sigma_{R_i} = \sigma_{-1}$  и  $\Psi_\sigma = \sigma_{-1}/\sigma_B$  получим

$$\sigma_{\text{ост}}^y = \frac{\sigma_{\text{ц.п}} - \sigma_{-1}}{\sigma_B - \sigma_{-1}} - \sigma_m. \quad (12)$$

Видно, что с увеличением  $\sigma_m$  значение  $\sigma_{\text{ост}}^y$  уменьшается. Приведенная зависимость (12) позволяет регулировать значение  $\sigma_{\text{ост}}^y$  внешним нагружением. Ее можно использовать при разработке способов повышения сопротивления усталости сварных конструкций.

## Выводы

1. Предложен расчетный способ определения диаграмм предельных напряжений цикла сварных стыковых соединений с любой величиной наперед заданных остаточных напряжений по результатам испытаний малогабаритных образцов.

2. Установлена закономерность изменения сопротивления усталости сварных стыковых соединений низкоуглеродистой и низколегированной стали в зависимости от величины установившегося остаточного напряжения.

3. Показано, что использование такой характеристики, как минимальный предел циклической ползучести, повышает точность расчета диаграмм предельных напряжений цикла сварных соединений с высокими остаточными напряжениями.

## Резюме

Запропоновано методику побудови діаграм граничних напружень циклу зварних з'єднань із наперед заданими усталеними залишковими напруженнями за результатами випробувань малогабаритних зразків без залишкових напружень.

1. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. – Киев: Наук. думка, 1973. – 216 с.
2. Hobbacher A. Recommendations on Fatigue of Welded Components. – IIW Document X-1539-94/XV-845-94. – 112 p.
3. РД 50-694-90. Методические указания. Надежность в технике. Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций. – Введ. 01.07.91.
4. Дучинский Б. Н. Выносливость элементов сварных мостовых конструкций при переменных и знакопеременных напряжениях // Исследование прочности сварных мостовых конструкций. – М.: Трансжелдориздат, 1956. – Вып. 20. – С. 86 – 163.

5. Труфяков В. И., Кудрявцев Ю. Ф., Михеев П. П. О влиянии остаточных напряжений на сопротивление усталости сварных соединений // Автомат. сварка. – 1988. – № 2. – С. 1 – 4.
6. Дегтярев В. А., Шульгинов Б. С. Оценка предельных напряжений цикла сварных конструкций с высокими остаточными напряжениями по результатам испытаний малогабаритных образцов без остаточных напряжений // Пробл. прочности. – 2008. – № 2. – С. 66 – 81.
7. Труфяков В. И., Михеев П. П., Кудрявцев Ю. Ф. Изменение сопротивления усталости сварных соединений под воздействием остаточных напряжений: Тр. III Всесоюз. симп. “Остаточные технологические напряжения” (Кутаиси, 10–13 окт. 1988 г.). – М.: Ин-т пробл. механики АН СССР, 1988. – С. 358 – 364.
8. Reik W., Mayr P., und Macherauch E. Eine notwendige Änderung der Dauerfestigkeitsschaubilder bei Schwingfestigkeitsuntersuchungen // Arch. Eisenhüttenwes. – 1981. – 52, No. 8. – S. 325 – 328.
9. Дегтярев В. А. Влияние коэффициента асимметрии цикла напряжений на усталость и циклическую ползучесть низколегированных сталей // Пробл. прочности. Сообщ. 2. – 1991. – № 2. – С. 27 – 31.

Поступила 25. 10. 2007